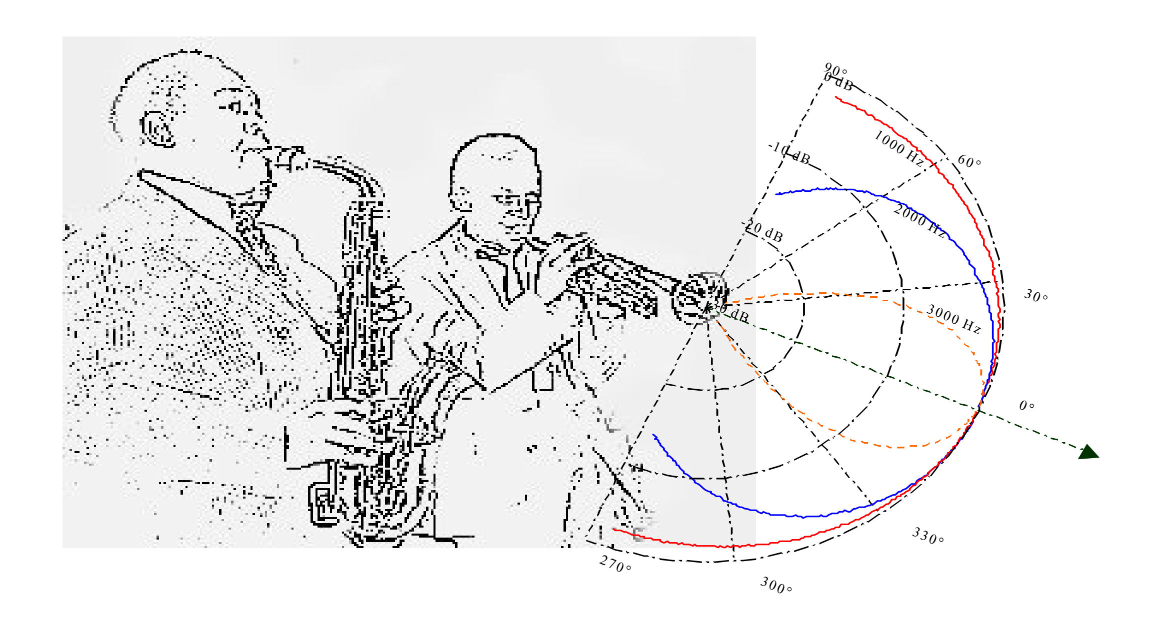
LICENCE SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES - 3

MENTION ARTS ET TECHNOLOGIES

SPÉCIALITÉ : MATERIAUX SONORES ET ENREGISTREMENT MUSICAL

Cours de Physique du son – Olivier CALVET

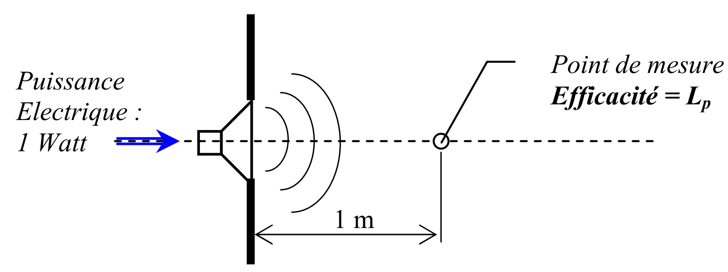
COURS 3



1. Fonctionnement interne des enceintes acoustiques.

1.1. Caractéristiques principales du HP.

Efficacité du HP : Mesure du niveau de pression sonore (en dB) restitué par le haut-parleur à la distance de **1 m** et suivant son axe, lorsqu'on injecte un signal électrique de **1 Watt** et contenant toutes les fréquences audibles. Le Haut-parleur est encastré dans un baffle plan.



Exemple de donnée constructeur : *Efficacité (bruit rose):106 dB pour 1 watt, mesuré à 1 mètre*

Rendement : Rapport entre la puissance acoustique rayonnée et la puissance électrique nominale d'entrée. Donnée sous forme de pourcentage.

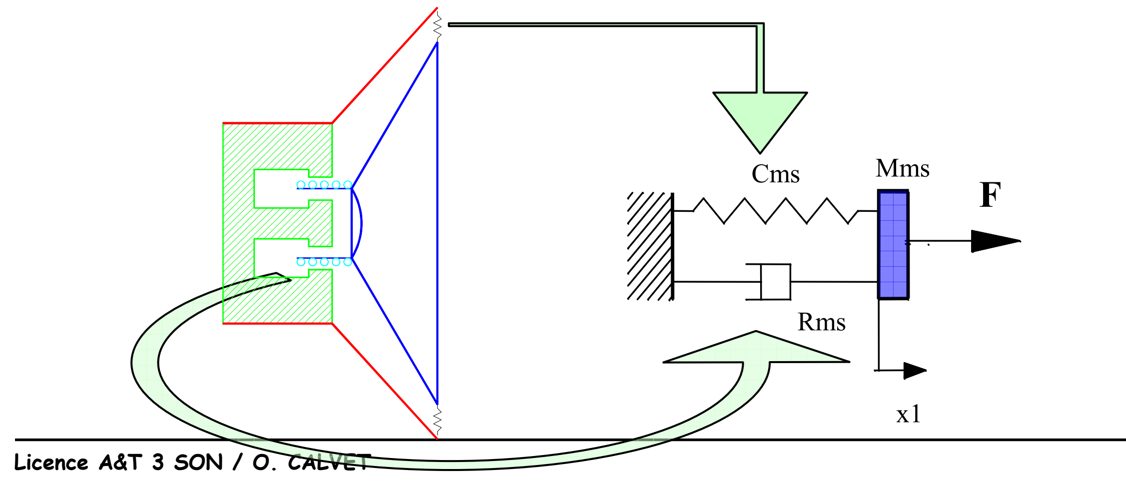
Impédance du Haut-parleur :

Impédance nominale (8 Ω, 16 Ω, 4 Ω) : Valeurs normalisées, permettant d'adapter le Haut-parleur à un système d'amplification. En fait il s'agit d'une valeur proche du minimum de l'impédance du haut-parleur.

Facteur de force (B.L) : Produit entre le **champ magnétique B** (en Tesla) et **la longueur du bobinage** (en m). Il s'agit du rapport entre l'action mécanique (F) produisant le mouvement de l'équipage mobile et de l'intensité (I) du courant parcourant la bobine mobile.

$$F = (\mathbf{B.L}).I$$

Masse, Raideur, Amortissement de l'équipage mobile (Mms, Cms, Rms) : Le comportement mécanique de l'équipage mobile d'un haut-parleur s'apparente à un système masse ressort. La masse (Mms) est celle de l'ensemble 'équipage mobile'. Le ressort (de compliance mécanique Cms) est représenté par les suspensions périphériques (ou spiders). L'amortissement (Résistance mécanique Rms) est due aux cavités arrières se trouvant entre l'ensemble aimant et l'équipage mobile.



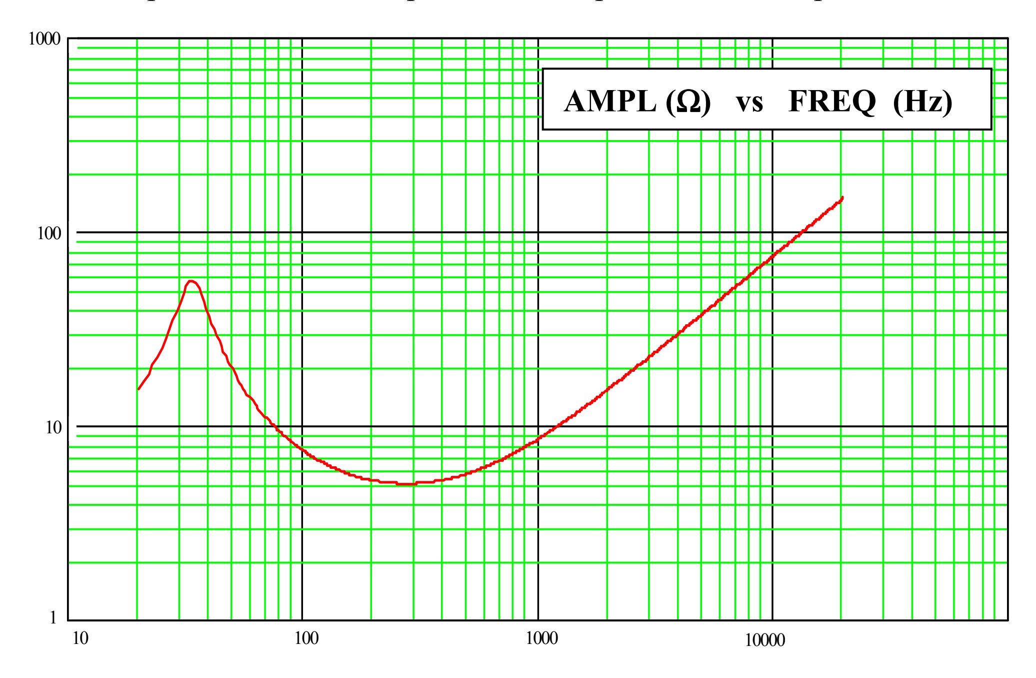
1.2. Impédance du Haut-parleur

L'impédance électrique du Haut-parleur est par définition le rapport entre la tension d'entrée aux bornes du HP et de l'intensité électrique parcourant le bobinage.

$$Z_{HP} = \frac{E}{I}$$

Du fait du couplage électromécanique de l'ensemble, le mouvement de l'équipage mobile va introduire une force contre électromotrice dans le circuit électrique. (e(t) = B.l.v(t) ; v(t) étant la vitesse de l'équipage mobile).

La courbe représentative de l'amplitude de l'impédance du haut-parleur est :



Maximum de l'impédance du HP

Ce maximum est obtenu pour la fréquence propre (ou fréquence de résonance en vitesse) de l'équipage mobile : $f_r = \frac{1}{2.\pi}.\sqrt{\frac{1}{Mms.Cms}}$.

Dans ce cas le module de l'impédance est : $|Z_{HP}|_{MAX} = R + \frac{(BL)^2}{Rms}$

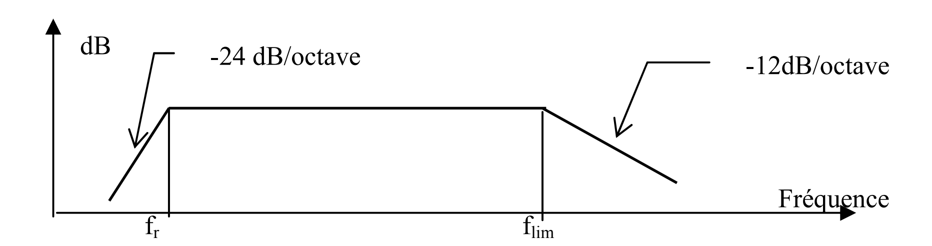
Pour un BOOMER, la fréquence de résonance vaut quelques dizaines de Hertz.
Pour un MEDIUM, la fréquence de résonance vaut quelques centaines de Hertz.

2. Rayonnement des haut-parleurs

2.1. Courbe de réponse

La courbe de réponse du haut-parleur électrodynamique classique comporte trois zones de fonctionnement :

- Une zone en-dessous de la fréquence de résonance f_r, où l'efficacité décroît très rapidement.
- Une zone entre f_r et une fréquence limite f_{lim} dépendante du diamètre de la surface émissive de la membrane à peu près constante
- Une zone au-dessus de la fréquence limite f_{lim}, où l'efficacité du haut-parleur est très irrégulière (cela est due aux vibrations propres de la membrane qui interfèrent avec le signal d'entrée), et où la directivité devient très accentuée sur l'axe.



De manière générale, les constructeurs sont assez réticents à fournir les courbes de réponse de leurs transducteurs. Ces courbes sont en effet apparemment très inégales et présentent les défauts du haut-parleur. Il est plus simple de présenter les résultats sous la forme suivante :
Réponse en fréquence :120 Hz - 20000 Hz $\pm 3dB$ (attention il s'agit ici d'une enceinte complète, les Haut-parleurs seuls ne peuvent que rarement atteindre une linéarité pareille).

Lorsqu'on obtient les courbes, les documents constructeurs présentent uniquement la réponse du haut parleur suivant l'axe du HP et à 30° de cet axe. Ce qui indique assez bien les performances de l'appareil.

2.2. Expression de l'amplitude de la pression acoustique en un point quelconque

Théoriquement, il est possible d'avoir une idée plus globale du rayonnement (valable en tout point de l'espace) d'un haut-parleur, avec le modèle d'un piston circulaire plat :

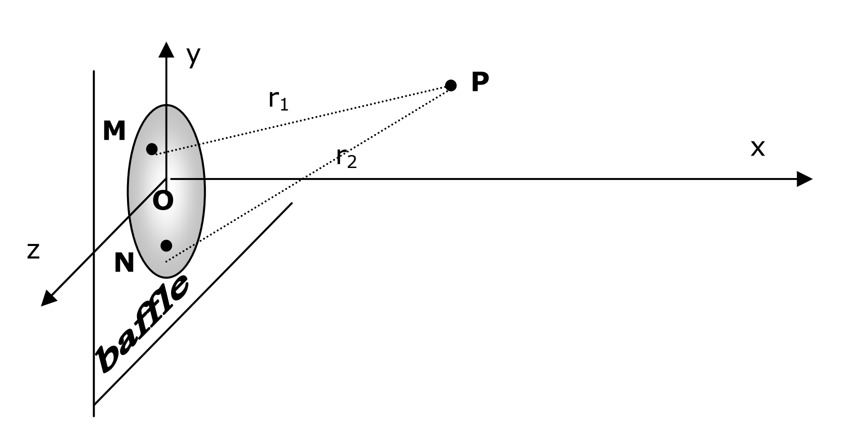


fig 5-31 : Schéma de principe mettant en évidence le problème du rayonnement d'un haut-parleur.

Le mouvement d'oscillation **x** de tout point du piston a pour expression : $x = X.e^{j.\omega.t}$ (et en particulier le point **M** et le point **N**), avec **ω** la pulsation du signal sonore à

Le problème du rayonnement d'une surface est que tout point de la surface vibrante du piston participe au mouvement vibratoire du point P suivant ***le principe de superposition***. Intuitivement, on peut remarquer que plus la surface va être importante plus la pression mesurée en un point va être importante.

Le développement des calculs n'étant pas présenté, l'expression de la pression rayonnée par le haut-parleur en tout point de l'espace est :

$p(r, \beta) = p_{axe}(r).h(\beta)$

$p_{axe}(r)$ est la pression sur l'axe du haut-parleur et dépend de la distance r.
$h(\beta)$ est la fonction de directivité du haut-parleur.

La théorie du piston plat permet d'obtenir les relations suivantes :

$$p_{axe}(r) = \frac{\rho.R_m^2.\omega}{2.r}.V$$

et

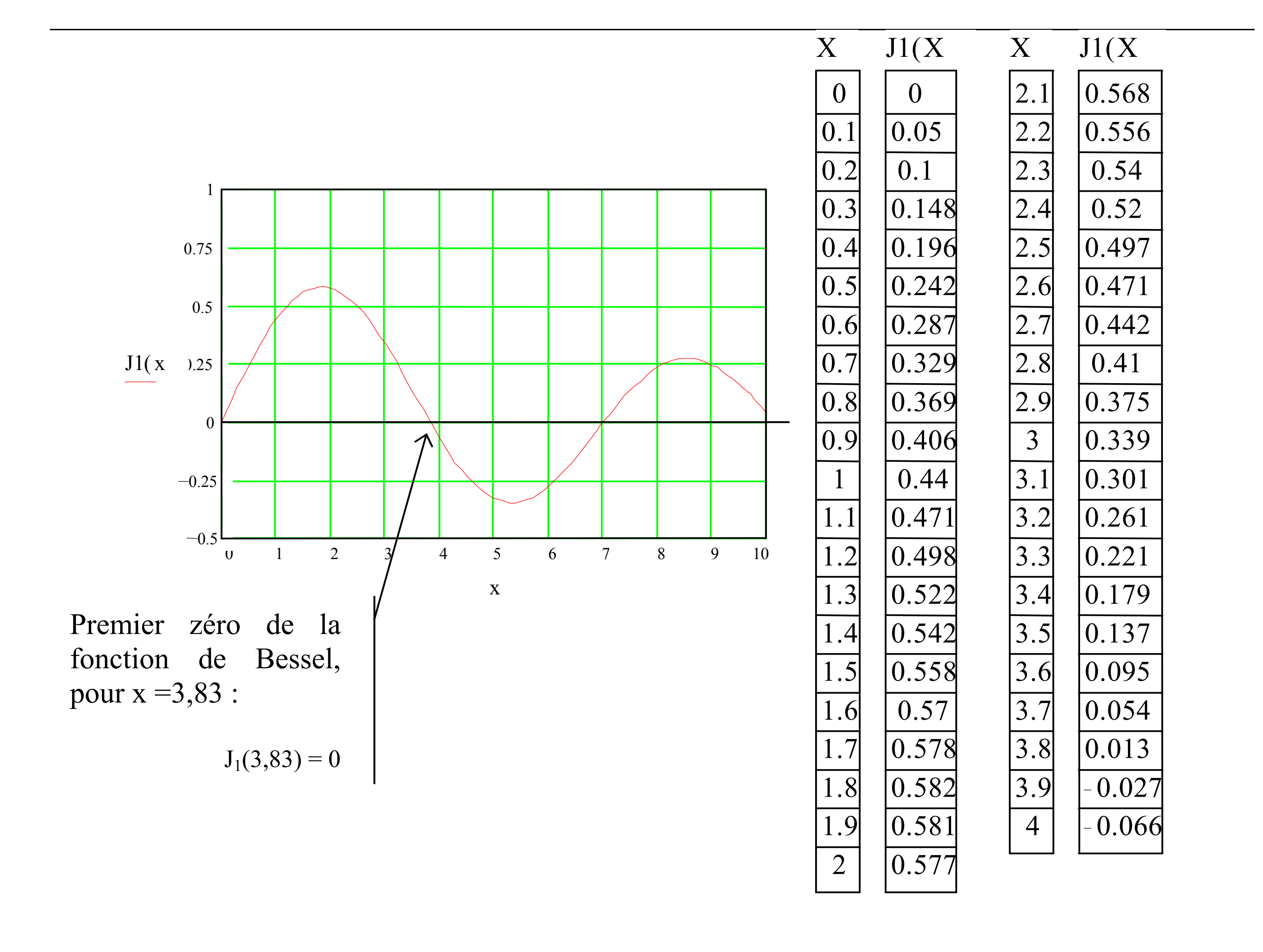
$$h(\beta) = \left[2.\frac{J_1\left(\frac{2.\pi}{\lambda}.R_m.\sin(\beta)\right)}{\left(\frac{2.\pi}{\lambda}.R_m.\sin(\beta)\right)} \right]$$

L'expression de la pression rayonnée p(r, β) est donc en champ libre :

$$p_{axe}(r) = \frac{\rho.R_m^2.\omega}{2.r}.V.\left[2.\frac{J_1\left(\frac{2.\pi}{\lambda}.R_m.\sin(\beta)\right)}{\left(\frac{2.\pi}{\lambda}.R_m.\sin(\beta)\right)} \right]$$

Avec **ρ** masse volumique
R_m Rayon actif du HP
ω la pulsation du signal
V la vitesse d'oscillation de la membrane du HP.
λ la longueur d'onde du signal.
β l'angle par rapport à l'axe du HP

$J_1(x)$ est la fonction de Bessel d'ordre 1. Il s'agit d'une fonction mathématique construite pour les besoins de la physique (au même titre que le fonction sin(x), exp(x)...). Ci-dessous sont données les tables de cette fonction ainsi qu'une représentation graphique :



X	J1(X	X	J1(X
0	0	2.1	0.568
0.1	0.05	2.2	0.556
0.2	0.1	2.3	0.54
0.3	0.148	2.4	0.52
0.4	0.196	2.5	0.497
0.5	0.242	2.6	0.471
0.6	0.287	2.7	0.442
0.7	0.329	2.8	0.41
0.8	0.369	2.9	0.375
0.9	0.406	3	0.339
1	0.44	3.1	0.301
1.1	0.471	3.2	0.261
1.2	0.498	3.3	0.221
1.3	0.522	3.4	0.179
1.4	0.542	3.5	0.137
1.5	0.558	3.6	0.095
1.6	0.57	3.7	0.054
1.7	0.578	3.8	0.013
1.8	0.582	3.9	-0.027
1.9	0.581	4	-0.066
2	0.577		

2.3. Exemple de rayonnement pour un haut-parleur BOOMER

Diagramme de Rayonnement du HP pour les fréquences 400 Hz et 800 Hz

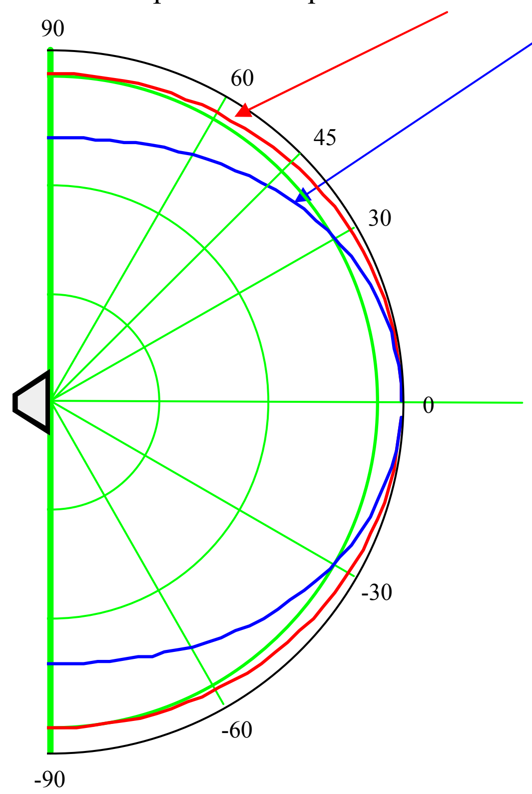
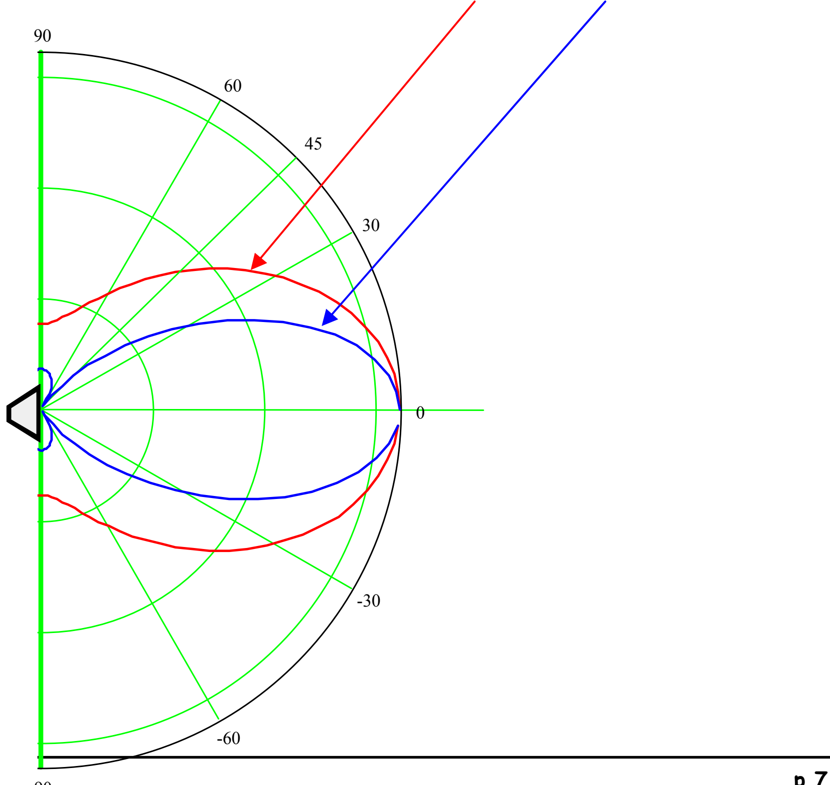


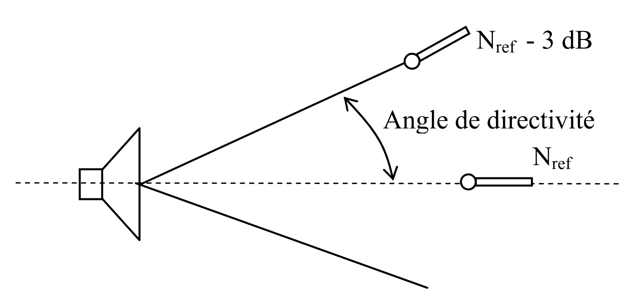
Diagramme de Rayonnement du HP pour les fréquences 1600 Hz et 2500 Hz



2.4. Caractéristiques de rayonnement d'un haut-parleur

2.4.1. Angle de directivité

On détermine l'angle de directivité pour une fréquence donnée délimitant la zone de rayonnement où le niveau de pression diminue de – 3 dB par rapport au niveau sonore sur l'axe du haut-parleur.



2.4.2. Angle d'annulation

On appelle angle d'annulation du haut-parleur l'angle β tel qu'il annule la fonction de directivité h(β). Pour annuler la fonction de directivité il faut annuler la fonction de Bessel. Soit avoir la condition suivante :

$$J_1\left(\frac{2.\pi}{\lambda}.R_m.\sin(\beta)\right)=0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{2.\pi}{\lambda}.R_m.\sin(\beta)=3{,}83 \qquad \text{(voir courbe de BESSEL)}$$

Dans l'exemple de rayonnement, on voit apparaître un angle d'annulation pour la fréquence 2500 Hz : on ne mesure plus de pression acoustique à 2500 Hz suivant la direction à 60° (environ).

2.4.3. Facteur de directivité Q

Définition

Par définition le facteur de directivité **Q** est le rapport de la pression acoustique de la source considérée comme isotrope au carré (rayonnement homogène) sur la pression acoustique réelle de la source mesurée suivant son axe et à 1m au carré. Soit l'expression :

$$Q=\frac{p^2{}_{axe}(1m)}{p^2{}_{sphère}(1m)}$$

Pression acoustique d'une source isotrope

La pression d'une source homogène en fonction de la puissance acoustique **W** de la source est (voir document « ***propagation du son*** »):

$$p^2{}_{sphère}=\frac{2.\rho.C.W}{4.\pi.r^2}$$

Avec ρ masse volumique
C Vitesse de propagation du son dans l'air

W la puissance acoustique de la source.
r la distance de la source au point de mesure ($4.\pi.r^2$ représentant la surface du front d'onde). I

Expression du facteur de directivité.

Le facteur de directivité est tel que :

$$Q = \frac{p^2_{axe}(1m)}{p^2_{sphère}(1m)}$$

Avec le facteur d'onde $k = \frac{2.\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{C}$

L'expression du facteur de directivité pour un haut-parleur est :

$$\boxed{Q = \frac{R_m^2.k^2}{R_1}}$$

Avec $\mathbf{R_1}$ tel que : $$R_1 = \left[1 - \frac{J_1(2.k.R_m)}{k.R_m}\right]$$

Quelques courbes de facteur de directivité en fonction de la fréquence

BOOMER

